基于高寒气候特征的高原公路养护施工材料性能与耐久性研究

姚杰

(西藏自治区昌都公路事业发展和应急保障中心, 西藏 昌都 854000)

摘要 高原地区独特的气候环境对公路养护施工材料提出了更高的要求。本文从高寒气候特征出发, 系统分析了温差变化、强紫外线辐射以及冻融循环对高原公路养护材料性能的影响机理。在此基础上, 重点研究了改性沥青材料、抗冻水泥混凝土、纤维增强复合材料以及防水防冻养护材料的配方优化与性能提升技术。针对高原公路养护需求, 提出构建养护材料性能评价指标体系, 开展材料耐久性试验研究, 分析材料性能衰变规律, 综合采取材料改性与工程措施相结合的方法来提升材料耐久性。研究成果旨在为高原地区公路养护材料的选用、设计以及耐久性提升提供理论指导和技术支撑。

关键词 高原公路; 养护施工材料; 高寒气候; 性能评估; 耐久性

中图分类号: U418

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.02.042

0 引言

高原地区地形地貌复杂, 气候环境恶劣, 给公路工程的建设和养护带来严峻挑战。受高海拔、大温差、强紫外线以及频繁冻融循环等因素影响, 普通公路材料在高原环境中易发生性能退化、耐久性不足等问题, 难以满足高原公路长期服役的需求。深入分析高寒气候特征对养护材料性能的影响, 研究适用于高寒环境的高性能养护材料, 对材料性能进行科学评估, 探索材料性能提升和耐久性改善的有效途径, 对于保障高原公路养护质量、延长公路使用寿命具有重要意义。

1 高寒气候特征对高原公路养护材料的影响

1.1 高原温差变化对材料内部结构的影响

高原地区昼夜温差大、季节温差明显, 材料经受频繁的冷热循环作用, 存在着结构破坏的潜在风险。在反复热胀冷缩过程中, 材料内部产生的热应力会逐步积累, 引起微观结构的不可逆演变。热应力诱导下, 材料内部的微裂纹不断萌生、扩展, 同时伴随着孔隙率的增大, 强度与整体性随之下降。以沥青混合料为例, 温度骤降时, 沥青的脆性增加, 抵抗变形的能力降低, 在车辆荷载作用下容易开裂、脱落, 破坏路用性能。因此, 揭示温差效应下材料微观结构的演变机制, 对阐明高原环境的材料破坏规律至关重要。

1.2 强紫外线辐射加速养护材料老化性分析

高原地区紫外线辐射度大, 加之日照时间长, 强辐射环境可加速有机质材料的老化进程。以沥青为代

表的路用材料, 在强紫外光的长期照射下, 老化速率明显提高。紫外线穿透材料表面后, 切断分子链中的化学键, 引发光解反应, 导致材料发生交联、断链等一系列微观结构改变, 表现为硬化、脆化等性能的退化, 最终引起开裂、碎裂等失效模式。针对这一老化机理, 亟需开展紫外光谱分析、光氧化动力学研究, 定量描述辐射剂量与材料性能的关联规律, 筛选高效光稳定剂, 优化防老化配方, 从而延缓紫外损伤, 提升材料的耐候性能^[1]。

1.3 冻融循环作用对材料力学性能影响机理

冻融破坏是高原公路养护的主要难题之一, 冬季漫长的低温环境, 使公路结构长期处于冻结状态, 内部孔隙水受冻胀力作用反复冻融, 引起材料微观结构的恶化。冻胀力诱发的微裂纹会在冻融循环中不断扩展, 导致材料强度与整体性下降, 力学性能逐步退化。以水泥混凝土为例, 内部的胶凝材料因冻融作用发生溶蚀、分解, 失去原有的黏结能力, 进而引起骨料脱落、露石现象, 最终导致混凝土破坏。因此, 揭示冻融循环作用下材料性能演变规律, 构建冻融损伤力学模型, 对指导抗冻材料的优化设计至关重要。

2 适用于高寒气候的高原公路养护施工材料

2.1 改性沥青材料的低温适应性性能优化研究

针对高原气候的需求, 应优选低温性能优异的沥青品种, 并辅以合理的改性措施, 提升其抗低温开裂能力。采用SBS、SBR等高分子聚合物对沥青进行改性,

可显著提高其低温柔韧性及延展性。通过优化改性剂用量与相容性,精细调控材料的力学性能与温度敏感性,使其在低温条件下仍能保持较好的柔性和韧性,有效抵御温度应力的破坏作用。同时,合理掺加橡胶粉、塑料等废旧材料,不仅能改善沥青的低温性能,还可提高材料的环保性与经济性。此外,完善成品沥青的低温性能评价方法,建立与工程实际紧密结合的低温指标体系,对指导改性沥青的配方优化与质量控制具有重要意义^[2]。

2.2 抗冻水泥混凝土配合比设计与性能分析

抗冻混凝土的设计核心是通过合理的配合比优化,最大限度降低混凝土的吸水率与饱水率,减少可冻水的数量,从而提高其抗冻融性能。在原材料选择上,宜优选低碱、低水化热的抗冻水泥,并辅以粉煤灰、矿粉等优质掺合料,改善混凝土的密实性。同时,掺加引气剂可有效引入微小气泡,在混凝土内部形成蓄水空间,缓解冻胀压力。减水剂的合理使用,可降低水胶比,提高混凝土强度。在集料选用方面,应满足粒径、级配、含泥量等要求,优化骨料堆积密实度。通过综合评定混凝土的抗冻等级,分析气泡间距系数、持久性、后期强度增长等性能参数,优选适宜的配合比方案,满足耐久性设计要求。

2.3 纤维增强复合材料的制备与工程应用

纤维增强水泥基复合材料具有高韧性、高抗裂性等优点,可有效延缓冻融破坏的发生。在水泥浆体中均匀掺入短切钢纤维、聚丙烯纤维、玄武岩纤维等,可构建三维立体网状结构,阻碍微裂纹的扩展,提高材料的抗裂能力。同时,纤维与基体间的黏结力与摩擦力可实现应力的传递,发挥裂缝钉锚与桥联作用,提高材料的损伤容限。在配合比设计中,应综合考虑纤维的长径比、体积掺量、分散性等因素,优选纤维品种与掺量范围,并通过界面改性处理提高纤维的抗拔性能。开展纤维复合材料的力学性能测试、冻融循环试验,评估其在高寒环境下的适应性,为实现规模化生产与工程应用奠定基础。

2.4 防水防冻养护材料的研发与适应性评价

防水防冻材料是抵御冻融侵蚀、延长公路寿命的重要手段。传统材料如 SBS 改性沥青类防水卷材、聚氨酯类涂料等,在高原极端气候下存在老化速度快、黏结性差等问题。应加大新型防水防冻材料的研发力度,突破传统路径限制,开发高性能、多功能、环保型新材料。例如,研制耐老化、高延展的 TPO 类防水

卷材,开发新型反应黏结型涂料,优化改乳化沥青的相容性与稳定性等。在材料设计中,应重点考虑其与基层的适应性、黏结性能,改善与沥青路面、混凝土的相容性。同时,材料还应具备优异的耐候性、抗冻性,以适应高原恶劣气候的长期考验。开展系统的适应性评价研究,测试其抗拉强度、断裂延伸率、不透水性、黏结强度等性能指标,分析材料的高温稳定性、低温柔性、抗紫外老化性能,筛选适宜的材料配方与质量控制指标^[3]。

3 高原公路养护施工材料性能评估与耐久性的提升策略

3.1 养护材料性能评价指标体系建立与应用

建立科学规范的材料性能评价指标体系对于高原公路养护施工具有重要意义,传统评价指标主要关注常规物理力学性能,包括强度、延展性等基础参数,这种单一的评价方式难以全面反映材料在高寒环境下的适应性能。针对高原环境特点,需要补充完善评价指标体系。首先,应重点突出高温稳定性、低温抗裂性、抗冻融性、耐久性等关键特性指标;其次,在常规指标基础上引入低温弯曲试验、低温万能试验等专项性能指标,通过定量评估掌握材料的温度敏感特性;最后,抗冻融性能评价需要通过冻融循环试验、相对动弹弹性模量试验等方法准确反映材料的内部损伤程度。在耐久性能评价方面,可采用紫外老化试验、淋水老化试验等加速老化方法进行考核。对评价指标体系的应用需要采取“室内试验—路试评价—工程验证”一体化研究思路,注重分析各级指标之间的内在关联性,确保评价结果具有实际工程应用价值。为确保材料性能评价的科学性与可靠性,还需建立养护材料性能数据信息化管理平台,实现数据的规范化采集与存储。通过科学合理的材料性能评价指标体系,为养护材料选型、配方优化和工程质量控制提供可靠的技术支撑^[4]。

3.2 材料耐久性试验方案设计与评价研究

高原公路养护材料的耐久性直接影响工程使用寿命,开展材料耐久性试验研究需要科学构建模拟高原环境的劣化加速模型。由于高原环境复杂多变,试验方案设计应充分考虑各种环境因素的影响。一方面,需要充分考虑昼夜温差、紫外辐射、冻融循环等多因素的耦合效应,合理设置试验参数与加载方式,最大限度模拟材料在实际环境中的劣化过程;另一方面,通过运用气候老化箱、紫外老化箱等先进设备,实现温度、湿度、辐射等环境因子的精确控制,系统开展

高低温循环、紫外照射、冻融循环等单因素或多因素耦合试验。在耐久性评价内容方面,需要涵盖力学性能、变形特性、表观形貌、微观结构等多个层次,全面反映材料在极端条件下的性能演变规律。评价指标应与性能衰变机理紧密结合,结合扫描电镜、红外光谱等微观分析手段,揭示劣化过程中的微观结构变化规律,建立与宏观性能参数的定量关联。针对不同类型养护材料,建立相应的性能衰变预测模型,实现材料使用寿命的科学评估。同时,基于试验数据建立材料性能演变数据库,为新型养护材料的研发与应用提供基础数据支持。通过系统的耐久性试验研究与评价体系构建,实现高原公路养护材料性能衰变规律的准确预测与寿命评估。

3.3 基于环境因素的材料性能衰变规律分析

高原环境因素对养护材料性能的影响错综复杂,准确把握材料性能演变规律对提升工程耐久性具有重要意义。厘清环境因素与材料性能间的定量关系,揭示材料在动态环境荷载下的劣化演变机理,对延长公路使用寿命、制定养护策略至关重要。研究方法上宜采用大型户外暴露试验与室内加速老化试验相结合的方式,利用高原实际道路开展材料野外暴露试验,实施环境参数与材料性能指标的长期跟踪监测,获取性能衰减的原位数据。同时针对性开展室内环境模拟试验,提炼温度—湿度循环、紫外辐射、冻融作用等关键影响因子,深入研究单因素与多因素耦合作用下的劣化机理。在环境因素分析中,需系统探讨不同因素的影响权重,建立变量与材料宏微观性能间的函数关系。此外,还要考虑荷载—环境耦合作用,研究交通荷载与环境因素的协同效应,探究材料性能衰变的内在机制与演变规律。基于长期监测数据与试验结果,构建多元环境因素影响下的性能衰变模型,实现材料性能演变规律的定量描述与预测^[5]。结合现场检测与室内试验,建立环境因素—材料性能响应数据库,开发性能预测模型。通过系统的环境因素影响机理研究与衰变规律分析,为评估材料耐久性能、预测材料服役寿命、指导养护周期提供科学依据。

3.4 养护材料耐久性提升技术与工程措施

延长养护材料耐久性,提高公路使用年限是高原公路养护的重要目标。研究表明,材料成分优化、新型养护技术应用、精细化施工工艺等多种途径可有效提升材料的长期使用性能。在材料优化方面,通过合理掺加抗老化剂、光稳定剂等功能性外加剂,提高材料的抗紫外老化性能,采用纳米改性技术优化沥青、

水泥等材料的微观结构,增强抗裂、抗冻融性能。同时,引入自修复材料利用损伤后自主修复特性延长使用寿命。在新型养护技术方面,超声波无损检测、红外热成像等技术实现材料内部缺陷的早期预警,为预防性养护提供技术支撑。此外,喷涂式防水封层、就地热再生等新工艺可有效封堵裂缝、修复局部病害,提高路面整体性能。在施工环节,优化摊铺温度控制、接缝处理等关键工序,提高施工精度,减少缺陷引入。做好伸缩缝设置、排水系统维护等配套工程,降低环境水对路基路面的不利影响。加强养护材料质量控制与施工过程管理,建立健全预防性养护制度,落实定期养护作业要求,及时发现并处治早期病害,持续改进养护工艺与施工技术水平。加大新材料、新技术、新工艺的研发与应用力度,持续优化养护材料配方与施工工艺。通过建立完善的预防性养护制度与科学合理的养护材料耐久性提升技术体系,实现高原公路养护工程的长期耐久性。

4 结束语

高原极端气候环境对公路养护材料性能的要求极高。系统开展养护材料在高寒条件下的性能影响机理、适应性材料优化、评价方法创新、长期性能演变规律、耐久性提升策略等方面的研究,可为高原公路的科学养护、长效管理提供坚实的技术保障,应进一步加强产学研用联动,突破关键核心技术,加速新材料、新工艺的转化应用,推动养护材料的绿色化、高性能化发展。同时,还应建立完善的技术标准规范,健全质量监管体系,为高原公路的高质量养护与可持续发展提供全链条的技术与政策支撑,助力高原地区交通运输事业的蓬勃发展。

参考文献:

- [1] 杨袁芳.高性能复合材料在公路施工养护中的应用研究[J].科技创新与生产力,2024,45(08):57-59,63.
- [2] 王茂健.公路养护施工质量管理中存在的问题与解决对策[J].运输经理世界,2024(21):139-141.
- [3] 唐贡辉,高天.公路养护中的材料选择与路面修复技术[J].运输经理世界,2024(17):126-128.
- [4] 李济杰.高速公路养护专项施工新材料新工艺的应用[J].工程建设与设计,2024(06):143-145.
- [5] 杨列全.高速公路养护专项施工新材料新工艺的应用[C]//中国交通建设监理协会2022年度学术论文集.山东方正公路工程咨询有限公司,2023.